Engng.J.CMU.(2010) 17 (2), 1-9

วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Engineering Journal
Chiang Mai University

การศึกษาความสามารถการรับภาระสูงสุดของท่อกระดาษผนังบางภายใต้ภาระกดในแนวแกน

The Study of Maximum Load of Thin-wall Paper Tube Under Axial Compressive Load

ปิยะพงษ์ ปันทนา และ ธงชัย ฟองสมุทร

Piyaphong Pantana and Thongchai Fongsamootr

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,

Chiang Mai University, 50200, Thailand

Email: nut_pi356@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อทำศึกษาถึงความสามารถรับภาระกดแบบสถิตสูงสุดในแนวแกนของท่อกระดาษผนังบาง โดยทำการศึกษาจากการทดลองการกดด้วยเครื่องทดสอบวัสดุยูนิเวอร์แซล ยี่ห้ออินสตรอน รุ่น 5566 ที่อัตรากดคงที่ 2 มิลลิเมตรต่อนาที และการคำนวณทางทฤษฎีแล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน ชิ้นงานทดสอบถูกสร้างด้วยกระดาษคราฟท์สำหรับทำผิวกระดาษกล่อง โดยมีการปรับเปลี่ยนตัวแปรรัศมี 3 ค่าได้แก่ 25 35 และ 50 มิลลิเมตร ความสูงของท่อผนังบาง 3 ค่าคือ 100 200 และ 300 มิลลิเมตร ความหนาของกระดาษ 3 ชนิดคือ 125, 185 และ 230 แกรม ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.157, 0.236 และ 0.298 มิลลิเมตร และการรับภาระกดในทิศทางกดตามแนวขนานและขวางเครื่อง พบว่าค่าภาระกดสูงสุดจากการทำการทดลองและการคำนวณทางทฤษฎีมีแนวโน้มสอดคล้องกัน และความหนาท่อผนังบางมีผลต่อการรับภาระกดสูงสุดมากที่สุด

ABSTRACT

This paper presents the study on the maximum static axial compressive load of thin-wall paper tube. The experiment, which used universal materials testing machine: Instron series 5566, with a constant compression rate 2 mm/min, and theory calculation will be studies and then the results were compared. The specimens were created from Kraft-Paper. There were 3 values of radii, which are 25, 35 and 50 millimeters, and height that are 100, 200 and 300 millimeters. The specimens were divided to 3 types: 125, 185 and 230 gram. The thicknesses of each type were 0.157, 0.236 and 0.298 mm, respectively. And compressive load were applied in machine and cross machine direction of paper. The results showed that the maximum compressive load of experiment and theory calculation were consistent trend. And thickness had the most influenced on the maximum compressive load.

ลิขสิทธิ์คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by
Faculty of Engineering
Chiang Mai University
All Rights Reserved

1. บทนำ

กระดาษเป็นแผ่นวัสดุที่ได้จากการนำวัสดุหลายชนิดมาผสมเข้ากันดีแล้วนำไปทำเป็นแผ่น ซึ่งวัสดุที่ใช้ผสมเหล่านี้ได้แก่ เส้นใยสั้น เส้นใยยาว และสารเคมี วัสดุที่ใช้ผสมเหล่านี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นองค์ประกอบหลักของกระดาษ ได้แก่ ส่วนที่เป็นเส้นใย (Fibrous material) ซึ่งเป็นโครงสร้างของแผ่นกระดาษ และส่วนที่ไม่ใช่เส้นใย ซึ่งเป็นสารเติมแต่งใช้ในการผสมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของกระดาษให้ได้ตามวัตถุประสงค์การใช้งาน

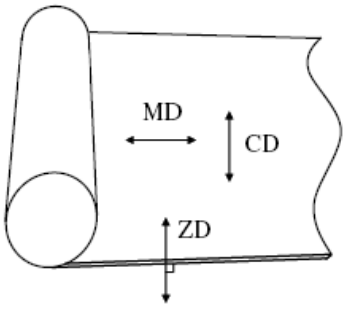
กระดาษเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ต้นทุนต่ำ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลายรูปแบบ อีกทั้งยังมีผิวที่สวยงามจากการพิมพ์ลวดลายลงบนกระดาษและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการแยกเยื่อกระดาษแล้วนำมาขึ้นรูปใหม่ เมื่อนำมารวมกับโครงสร้างท่อผนังบางซึ่งมีคุณสมบัติเด่นคือ มีน้ำหนักเบาและมีอัตราการดูดซับพลังงานจากการกระแทกต่อน้ำหนักสูง จึงเป็นอีกแนวคิดหนึ่งที่นำลักษณะเด่นของทั้งสองมารวมกันเป็นวัสดุทางเลือกที่นำมาใช้เป็นโครงสร้างรับภาระแรงหรือใช้ป้องกันความเสียหายจากแรงภายนอก เช่น บรรจุภัณฑ์รูปทรงต่างๆ ผนังกระดาษอัด หรือเฟอร์นิเจอร์ที่ทำจากกระดาษ เป็นต้น ซึ่งในการออกแบบสิ่งเหล่านี้จำเป็นต้องทราบถึงความสามารถในการรับภาระสูงสุด เพื่อใช้ในการออกแบบป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้าง ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาถึงความสามารถในการรับภาระสูงสุดของท่อกระดาษผนังบาง โดยในบทความนี้จะศึกษาถึงความสามารถในการรับภาระสูงสุดภายใต้การรับภาระกดในแนวแกนแบบสถิตของท่อกระดาษผนังบาง

2. หลักการและทฤษฎี

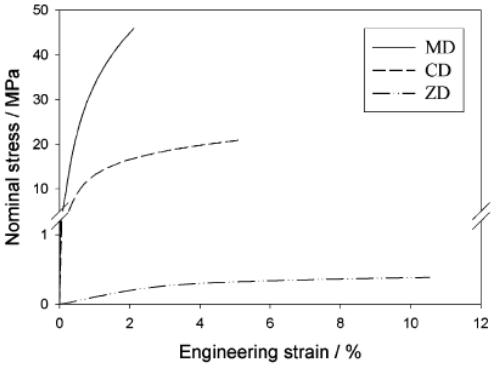
2.1 คุณสมบัติทางกลของกระดาษ

พฤติกรรมทางกลของกระดาษนั้นมีหลากหลายลักษณะ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะมีพฤติกรรมแบบ Highly anisotropic linear elastic เมื่อรับภาระโหลดปานกลาง (Moderate mechanical loading) และจะแสดงพฤติกรรมแบบ Non-linear plastic ภายใต้ภาระที่สูง (High loading) อีกทั้งความชื้นและอุณหภูมิยังมีผลต่อพฤติกรรมเชิงกลของกระดาษสูงอีกด้วย

ในกระบวนการผลิตกระดาษ เส้นใยจะถูกนำมาผสมกับน้ำและสารแต่งเติมต่างๆ แล้วฉีดพ่นออกมาลงบนตาข่าย จากนั้นจะถูกนำไปดึงน้ำออก กดอัด และทำให้แห้ง ซึ่งในกระบวนการฉีดพ่นเส้นใยออกมามีผลทำให้การเรียงตัวของเส้นใยอยู่ในแนวขนานเครื่อง (Machine direction, MD) มากกว่าแนวขวางเครื่อง (Cross machine direction, CD) และเรียกภาคตัดขวางของกระดาษว่าทิศทางผ่านความหนา (Thickness direction, ZD) ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยทั่วไปแล้วกระดาษถูกพิจารณาเป็นวัสดุออโทรทรอปิก (Orthotropic Material) คือมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันบนระนาบเดียวกัน ซึ่งตามปรกติแล้วค่าความเค้นครากหรือความเค้นเสียหายในแนวขนานเครื่องจะมีค่ามากกว่าแนวขวางเครื่องอยู่ประมาณ 2-4 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 2



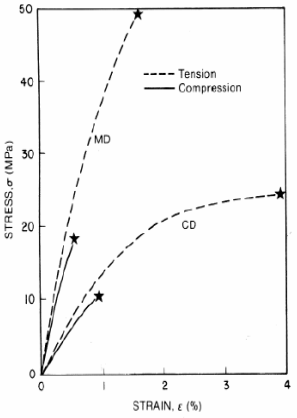
รูปที่ 1 ทิศทางแกนหลักของกระดาษ



รูปที่ 2 กราฟคุณสมบัติตามแกนหลักของกระดาษแข็ง

ลิขสิทธิ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Faculty of Engineering Chiang Mai All Rights

โดยทั่วไปแล้วกระดาษจะสามารถรับภาระการดึงได้ดีกว่าการกดเป็นผลทำให้ค่าความเค้นเสียหายนั้นแตกต่างกันค่อนข้างมากดังแสดงในรูปที่ 3 แต่ในกรณีที่รับภาระที่ไม่มากนักจะพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในกรณีรับภาระการกดและการดึงยังคงมีลักษณะใกล้เคียงกันและสามารถนำมาใช้แทนกันได้ [1]



รูปที่ 3 ความแตกต่างของความเค้นในกรณีรับภาระการดึงและการกด

2.2 หลักการวิเคราะห์ค่าความเค้นโก่งงอ (Buckling Stress)

ค่าความเค้นโก่งงอเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่โครงสร้างหนึ่งจะรับได้ก่อนจะเกิดการพังทลายของโครงสร้างนั้น ซึ่งสำหรับโครงสร้างรูปแบบท่อผนังบางรูปทรงกระบอกที่รับภาระกดในแนวแกนเพียงอย่างเดียวนั้นสามารถคำนวณหาค่าความเค้นโก่งงอได้ตามสมการที่ 1

$$\sigma_{cr} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}}\frac{t}{R} \qquad (1)$$

โดยที่ σ_{cr} คือ ความเค้นโก่งงอ

E คือ มอดูลัสของยัง (Young's modulus)

ν คือ อัตราส่วนของป้วซอง (Poisson's ratio)

t คือ ความหนาของท่อผนังบาง

R คือ รัศมีของท่อผนังบาง

สำหรับกระดาษที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุออโทรทรอปิกซึ่งมีค่ามอดูลัสของยังขึ้นกับทิศทางของกระดาษ จึงไม่สามารถใช้สมการที่ 1 ได้โดยตรง ดังนั้นจึงใช้วิธี Geometric Mean Isotropic Material มาช่วยในการคำนวณหาค่าความเค้นโก่งงอ โดยมีสมการสำเร็จดังสมการที่ 2 [2]

$$\sigma_{cr} = \begin{cases} \dfrac{\eta E\sqrt{g_{12}}}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} & \text{for } 0 < g_{12} < 1 \\ \dfrac{\eta E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} & \text{for } g_{12} \geq 1 \end{cases} \qquad (2)$$

เมื่อ $\eta = \dfrac{t}{R}$

$E = \sqrt{E_1 E_2}$

$\nu = \sqrt{\nu_1 \nu_2}$

$G = \dfrac{E}{2(1+\nu)}$

$g_{12} = \dfrac{G_{12}}{G}$

G_{12} คือ ความเค้นเฉือน

โดยที่เลข 1 และ 2 สำหรับค่า E และ ν หมายถึงค่าในทิศทางตามความสูงและตามแนวรัศมีของท่อผนังบาง

จากค่าความเค้นโก่งงอที่ได้สามารถนำมาคำนวณหาภาระกดสูงสุดในแนวแกนได้ตามสมการที่ 3

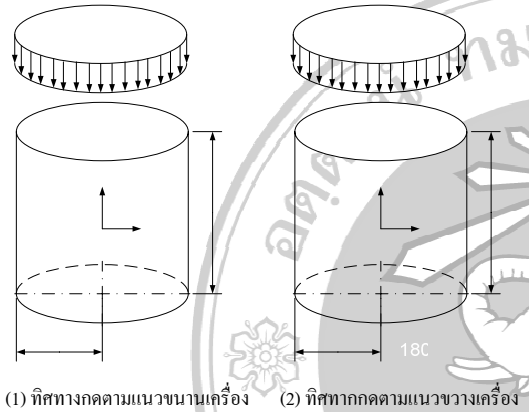
$$P_{cr} = 2\pi R t \sigma_{cr} \qquad (3)$$

โดยที่ P_{cr} คือ ภาระกดสูงสุดในแนวแกน

3. ลักษณะของปัญหา

ในการวิจัยนี้จะศึกษาเกี่ยวกับท่อผนังบางที่รับภาระกดในแนวแกน โดยกำหนดมิติของท่อผนังบางให้มีรัศมีของท่อผนังบาง (R) จำนวน 3 ค่า โดยรัศมีแต่ละค่าจะแปรผันความสูงของท่อผนังบาง (h) อีก 3 ค่า และความหนาของท่อ (t) อีก 3 ค่า โดยสร้างชิ้นงานทดสอบ 2 แบบคือให้ทิศทางของภาระกดขนานกับคุณสมบัติของวัสดุในแนวขนานและขวางเครื่องดังรูปที่ 4

ลิขสิทธิ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Faculty of Engineering Chiang Mai University All Rights Reserved



รูปที่ 4 ท่อผนังบางรับภาระกดในแนวแกน

รูปที่ 5 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล ยี่ห้ออินสตรอน รุ่น 5566 ระหว่างทดสอบกด

4. วิธีการวิจัย

4.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

เตรียมชิ้นงานทดสอบภายใต้ภาวะอุณหภูมิ 23 ± 1°C และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ± 2 แล้วทดสอบชิ้นงานทดสอบหลังจากเก็บชิ้นงานทดสอบไว้ที่ภาวะเดียวกันเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM D685-93 [3]

สร้างชิ้นงานทดสอบด้วยกระดาษคราฟท์สำหรับทำผิวกระดาษกล่อง 3 ชนิด คือ 125, 185 และ 230 แกรม ซึ่งมีความหนาเท่ากับ 0.157, 0.236 และ 0.298 มิลลิเมตร โดยสร้างท่อทรงกระบอกที่มีรัศมีเท่ากับ 25, 35 และ 50 มิลลิเมตร ความสูง 100, 200 และ 300 มิลลิเมตร และสร้างแบบทิศทางกดตามแนวขนานและขวางเครื่อง จะได้รูปแบบชิ้นงานทดสอบจำนวน 54 รูปแบบ โดยแต่ละแบบทำการทดลองซ้ำแบบละ 5 ครั้ง รวมจะต้องทดลองชิ้นงานทดสอบจำนวน 270 ครั้ง

4.2 การทดสอบชิ้นงาน

ทำการกดชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องทดสอบวัสดุยูนิเวอร์แซล ยี่ห้ออินสตรอน รุ่น 5566 (The universal materials testing machine: Instron series 5566) ด้วยอัตราการกดในแนวแกนเท่ากับ 2 มิลลิเมตรต่อนาทีดังรูปที่ 5 ในภาวะเดียวกันกับการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

5. ผลและการวิเคราะห์

5.1 ผลจากการทดลองจริง

หลังจากทำการทดสอบตามหัวข้อ 4.2 ได้ผลการทดลองตามตารางที่ 1 และตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ภาระสูงสุดของทิศทางกดตามแนวขนานเครื่อง

ขนาดชิ้นงาน (รัศมี – ความสูง)	ภาระกดสูงสุด (นิวตัน)		
	ชนิด 125 แกรม	ชนิด 185 แกรม	ชนิด 230 แกรม
25-100	55.82	152.35	313.38
25-200	58.55	149.37	325.45
25-300	52.48	155.77	320.55
35-100	54.78	156.61	332.42
35-200	56.03	162.21	323.57
35-300	57.86	159.63	301.36
50-100	52.97	160.71	311.73
50-200	52.86	152.74	309.85
50-300	53.05	154.27	324.63

ลิขสิทธิ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Faculty of Engineering Chiang Mai University All Rights Reserved

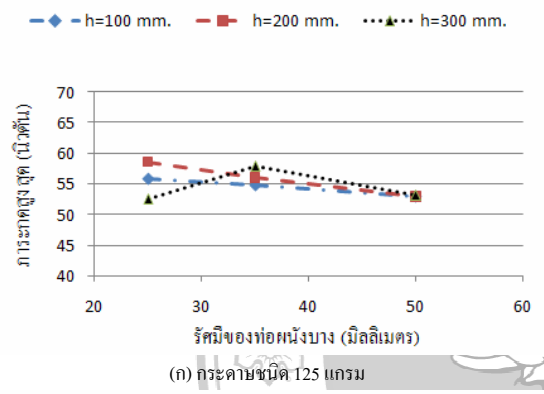
ตารางที่ 2 ภาระสูงสุดของทิศทางกดตามแนวขนานเครื่อง

ขนาดชิ้นงาน (รัศมี – ความสูง)	ภาระกดสูงสุด (นิวตัน)		
	ชนิด 125 แกรม	ชนิด 185 แกรม	ชนิด 230 แกรม
25-100	55.40	149.58	290.63
25-200	56.86	158.63	314.96
25-300	52.80	157.36	304.95
35-100	57.74	170.51	335.75
35-200	57.59	165.12	300.46
35-300	57.17	155.76	330.48
50-100	54.64	145.17	309.91
50-200	58.74	163.94	298.53
50-300	51.81	146.25	319.79

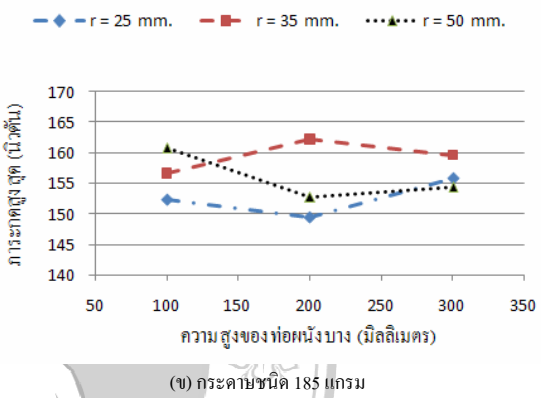
จากภาระสูงสุดของทิศทางกดตามแนวขนานเครื่องตามตารางที่ 1 เมื่อนำมาวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีกับภาระกดสูงสุดสำหรับกระดาษชนิด 125 แกรม จะได้กราฟดังรูปที่ 6 (ก) พบว่าที่ความสูง (*h*) เท่ากับ 100 และ 200 มิลลิเมตร เมื่อรัศมีของท่อ (*R*) เพิ่มขึ้น ภาระกดสูงสุดจะมีค่าที่ลดลง แต่สำหรับที่ความสูง (*h*) เท่ากับ 300 มิลลิเมตรพบว่าภาระกดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นที่รัศมี (*R*) เท่ากับ 35 มิลลิเมตร และมีค่าลดลงที่รัศมีเท่ากับ 50 มิลลิเมตร โดยมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดเท่ากับ 5.1, 9.7 และ 9.3 เปอร์เซ็นต์ ที่ความสูง (*h*) เท่ากับ 100, 200 และ 300 ตามลำดับ รูปที่ 6 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีกับภาระกดสูงสุดสำหรับกระดาษชนิด 185 แกรม ซึ่งพบว่าที่ความสูง (*h*) เท่ากับ 100 มิลลิเมตร ภาระกดสูงสุดของท่อกระดาษมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อรัศมี (*R*) เพิ่มขึ้น แต่จะมีลักษณะเพิ่มขึ้นที่รัศมี (*R*) เท่ากับ 35 มิลลิเมตร และลดลงที่รัศมี (*R*) เท่ากับ 50 มิลลิเมตร สำหรับความสูง (*h*) เท่ากับ 200 และ 300 มิลลิเมตร และเมื่อนำมาคำนวณเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดจะได้เท่ากับ 5.2, 7.9 และ 3.4 เปอร์เซ็นต์ ที่ความสูง (*h*) เท่ากับ 100, 200 และ 300 ตามลำดับ และจากรูปที่ 6 (ค) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีกับภาระกดสูงสุดสำหรับกระดาษชนิด 230 แกรม พบว่าที่ความสูง (*h*) เท่ากับ 100 มิลลิเมตร ภาระกดสูงสุดของท่อกระดาษมีลักษณะที่เพิ่มขึ้นที่รัศมี (*R*) เท่ากับ 35 มิลลิเมตร และลดลงที่รัศมี (*R*) เท่ากับ 50 มิลลิเมตร แต่ที่ความสูง (*h*) เท่ากับ 200 มิลลิเมตร ภาระกดสูงสุดมีลักษณะแนวโน้มที่ลดลงเมื่อรัศมี (*R*) เพิ่มขึ้น และที่ความสูง (*h*) เท่ากับ 300 มิลลิเมตร ภาระกดสูงสุดจะมีค่าที่ลดลงเมื่อรัศมี (*R*) เท่ากับ 35 มิลลิเมตร และเพิ่มขึ้นที่รัศมี (*R*) เท่ากับ 50 มิลลิเมตร เมื่อนำมาคำนวณเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดจะได้เท่ากับ 6.2, 4.8 และ 7.2 เปอร์เซ็นต์ ที่ความสูง (*h*) เท่ากับ 100, 200 และ 300 ตามลำดับ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่ารัศมีท่อผนังบาง (*R*) มีผลที่ไม่แน่นอนต่อภาระกดสูงสุด แต่ผลที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงที่ในช่วงแคบๆ ที่ไม่มากนัก

จากภาระสูงสุดของทิศทางกดตามแนวขนานเครื่องตามตารางที่ 1 เมื่อนำมาพิจารณาความสัมพันธ์ของความสูง (*h*) กับภาระกดสูงสุดดังรูปที่ 7 พบว่ากราฟความสัมพันธ์มีลักษณะหลากหลายรูปแบบคือ มีทั้งลักษณะที่เพิ่มขึ้นเมื่อความสูง (*h*) เพิ่มขึ้น ลดลงเมื่อความสูง (*h*) เพิ่มขึ้น เพิ่มขึ้นเมื่อความสูง (*h*) เท่ากับ 200 มิลลิเมตรแล้วลดลงเมื่อความสูง (*h*) เท่ากับ 300 มิลลิเมตร และ มีค่าลดลงเมื่อความสูง (*h*) เท่ากับ 200 มิลลิเมตรแล้วเพิ่มขึ้นเมื่อความสูง (*h*) เท่ากับ 300 มิลลิเมตร ซึ่งคล้ายกับผลของรัศมีท่อผนังบาง (*R*) และเมื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดที่รัศมีเท่ากับ 25, 35 และ 50 มิลลิเมตร สำหรับกระดาษชนิด 125 แกรม เท่ากับ 10.4, 5.3 และ 0.4 เปอร์เซ็นต์ สำหรับกระดาษชนิด 185 แกรมเท่ากับ 4.1, 3.4 และ 5.0 เปอร์เซ็นต์ และสำหรับกระดาษชนิด 230 แกรมเท่ากับ 3.7, 9.3 และ 4.6 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จึงกล่าวได้ว่าความสูงของท่อผนังบาง (*h*) มีผลที่ไม่แน่นอนต่อภาระกดสูงสุด และผลที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงแคบๆ ที่ไม่มากนักคล้ายกับผลจากการเปลี่ยนแปลงรัศมี (*R*)

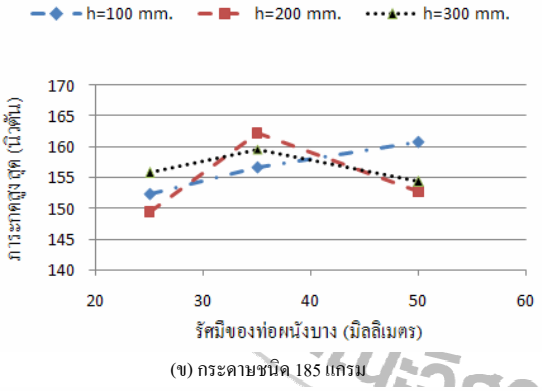
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Faculty of Engineering Chiang Mai University All Rights Reserved



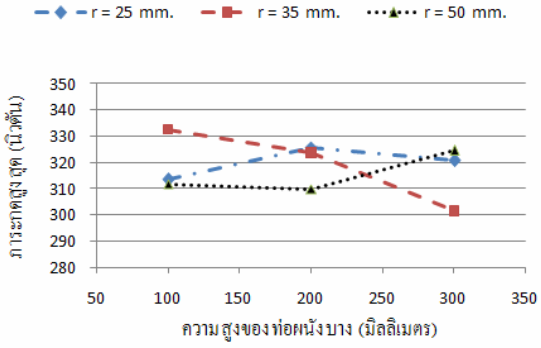
(ก) กระดาษชนิด 125 แกรม



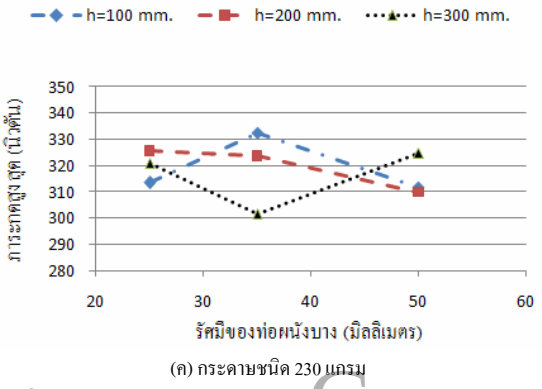
(ข) กระดาษชนิด 185 แกรม



(ข) กระดาษชนิด 185 แกรม

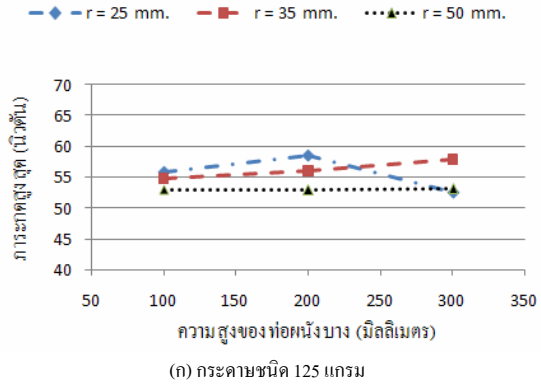


(ค) กระดาษชนิด 230 แกรม



(ค) กระดาษชนิด 230 แกรม

รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีกับภาระกดสูงสุดในทิศทางกดตามแนวขนานเครื่อง



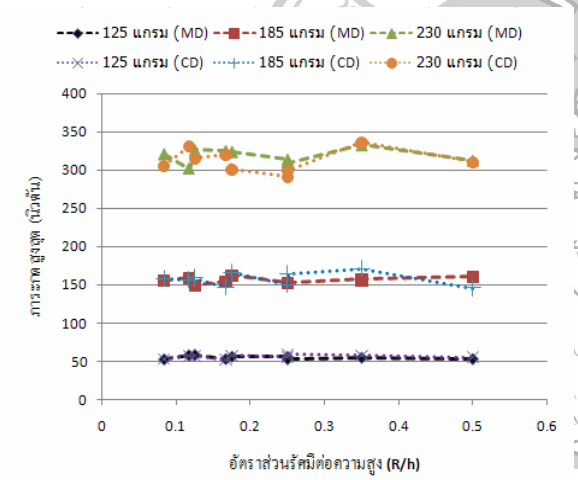
(ก) กระดาษชนิด 125 แกรม

รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกับภาระกดสูงสุดในทิศทางกดตามแนวขนานเครื่อง

จากภาระสูงสุดของทิศทางกดตามแนวขนานและขวางเครื่องตามตารางที่ 1 และตารางที่ 2 เมื่อนำมาวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนรัศมีต่อความสูงกับภาระกดสูงสุดดังรูปที่ 8 พบว่ากราฟมีลักษณะคล้ายเส้นตรงขนานไปกับแกนนอน เมื่อหาค่าเฉลี่ยของเส้นกราฟสำหรับทิศทางกดตามแนวขนานเครื่อง (MD) จะได้เท่ากับ 54.93, 155.96 และ 318.10 นิวตัน สำหรับกระดาษชนิด 125, 185 และ 230 แกรมตามลำดับ และสำหรับทิศกดตานแนวขวางเครื่อง (CD) จะได้เท่ากับ 55.86, 156.92 และ 311.72 นิวตัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างทิศทางกดตามแนวขนานและขวางเครื่องพบว่าภาระกดสูงสุดที่ออกมานั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากสำหรับกระดาษชนิดเดียวกัน และเมื่อนำมาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ผลต่างของภาระกดสูงสุดจะได้เท่ากับ 1.69, 0.62 และ 2.01 เปอร์เซ็นต์ สำหรับกระดาษชนิด 125, 185 และ 230 แกรมตามลำดับ ซึ่งกล่าว

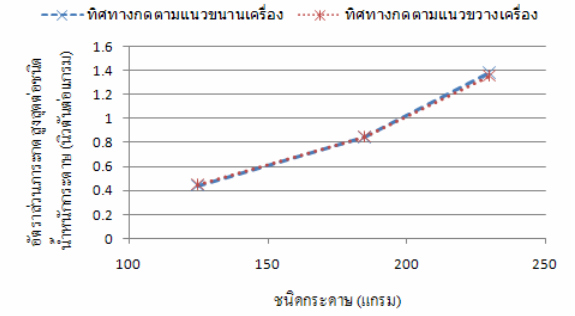
ศวกรรมศาสตร์
ลัยเชียงใหม่
Copyright©by
Faculty of Engineering
ai University
s Reserved

ได้ว่าทิศทางกดตามแนวขนานและขวางเครื่องนั้นไม่มีผลต่อภาระกดสูงสุดของท่อกระดาษผนังบาง



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนรัศมีต่อความสูงกับภาระกดสูงสุด

เมื่อพิจารณาชนิดน้ำหนักกระดาษพบว่า เมื่อน้ำหนักของกระดาษเพิ่มขึ้นจะทำให้จะทำให้ภาระกดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 55.40, 156.44 และ 314.91 นิวตัน ที่กระดาษชนิด 125, 185 และ 230 แกรม และหากนำมาวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างชนิดกระดาษกับอัตราส่วนภาระกดสูงสุดต่อชนิดน้ำหนักกระดาษดังรูปที่ 9 พบว่าความสามารถในการรับภาระกดสูงสุดต่อชนิดน้ำหนักกระดาษจะสูงขึ้นเมื่อน้ำหนักกระดาษมีค่ามากขึ้น อย่างไรก็ตามชนิดน้ำหนักกระดาษที่มากขึ้นจะมีผลทำให้ความหนาของกระดาษมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างชนิดกระดาษกับอัตราส่วนภาระกดสูงสุดต่อชนิดน้ำหนักกระดาษ

5.2 ผลจากการคำนวณทางทฤษฎี

ในการคำนวณทางทฤษฎีจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติเชิงกลของกระดาษคราฟท์ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งหาได้จากการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM (2002) D828-97 [4] ซึ่งได้ค่าดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ภาระสูงสุดของทิศทางกดตามแนวขนานเครื่อง

ชนิดกระดาษ (แกรม)	E_{MD} (GPa)	E_{CD} (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}
125	3.66	1.60	1.18	0.15
185	4.38	1.70	1.15	0.15
230	5.17	1.84	1.33	0.15

เมื่อคำนวณตามสมการที่ 2 และสมการที่ 3 จะได้ผลตามตารางที่ 4 และ ตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ภาระสูงสุดของทิศทางกดตามแนวขนานเครื่องจากการคำนวณทางทฤษฎี

ขนาดชิ้นงาน (รัศมี – ความสูง)	ภาระกดสูงสุด (นิวตัน)		
	ชนิด 125 แกรม	ชนิด 185 แกรม	ชนิด 230 แกรม
25-100	216.90	528.82	966.98
25-200	216.90	528.82	966.98
25-300	216.90	528.82	966.98
35-100	216.90	528.82	966.98
35-200	216.90	528.82	966.98
35-300	216.90	528.82	966.98
50-100	216.90	528.82	966.98
50-200	216.90	528.82	966.98
50-300	216.90	528.82	966.98

ลิขสิทธิ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Faculty of Engineering Chiang Mai University All rights Reserved

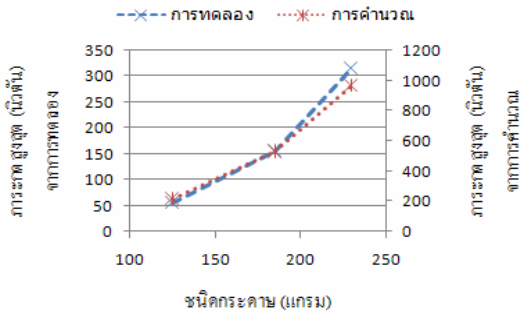
ตารางที่ 5 ภาระสูงสุดของทิศทางกดตามแนวขวางเครื่องจากการคำนวณทางทฤษฎี

ขนาดชิ้นงาน (รัศมี – ความสูง)	ภาระกดสูงสุด (นิวตัน)		
	ชนิด 125 แกรม	ชนิด 185 แกรม	ชนิด 230 แกรม
25-100	216.90	528.82	966.98
25-200	216.90	528.82	966.98
25-300	216.90	528.82	966.98
35-100	216.90	528.82	966.98
35-200	216.90	528.82	966.98
35-300	216.90	528.82	966.98
50-100	216.90	528.82	966.98
50-200	216.90	528.82	966.98
50-300	216.90	528.82	966.98

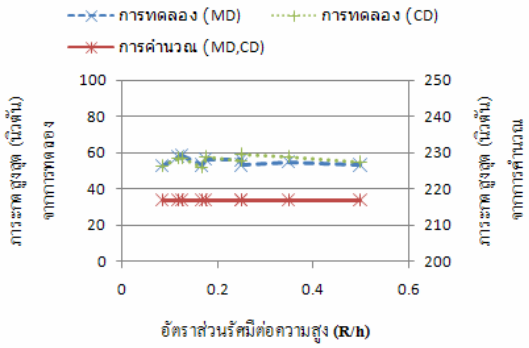
จากภาระกดสูงสุดจากการคำนวณทางทฤษฎีตามตารางที่ 4 และ ตารางที่ 5 พบว่าเมื่อท่อกระดาษมีการเปลี่ยนแปลงรัศมี (R) ความสูง (h) หรือ ทิศทางกดของท่อกระดาษ ค่าภาระกดสูงสุดที่ได้มีค่าที่ไม่เปลี่ยนแปลง โดยมีค่าเท่ากับ 216.90, 528.82 และ 966.98 นิวตัน สำหรับกระดาษชนิด 125, 185 และ 230 แกรม ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงสมการที่ใช้ในการคำนวณโดยนำค่าความเค้นโก่งงอในสมการที่ 2 มาแทนค่าลงในสมการที่ 3 พบว่า ค่าภาระกดสูงสุดจะแปรผันกับค่ามอดูลัสของยังและความหนาของท่อผนังบางยกกำลังสอง และแปรผกผันกับค่าอัตราส่วนของปัวซอง โดยที่ไม่ขึ้นกับค่าของรัศมีและความสูง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าภาระกดสูงสุดของท่อกระดาษผนังบางไม่ขึ้นกับรัศมีและความสูง อีกทั้งทิศทางกดตามแนวขนานและขวางเครื่องยังไม่ส่งผลกับภาระกดสูงสุดอีกด้วย

6. การเปรียบเทียบผล

เมื่อพิจารณาถึงแนวโน้มผลของตัวแปรที่ส่งผลต่อภาระกดสูงสุดพบว่า ผลจากการทดลองและจากการคำนวณทางทฤษฎีมีแนวโน้มคล้ายกันคือ มีแนวโน้มของภาระกดสูงสุดที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนความหนาหรือชนิดน้ำหนักกระดาษที่เพิ่มมากขึ้นดังรูปที่ 10 (ก) และมีแนวโน้มค่าภาระกดสูงสุดที่ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนรัศมี ความสูง และทิศทางการรับภาระกดตามแนวขนานหรือขวางเครื่องดังรูปที่ 10 (ข)



(ก) แนวโน้มของผลการเปลี่ยนแปลงชนิดน้ำหนักกระดาษ



(ข) แนวโน้มของผลการเปลี่ยนแปลงรัศมี ความสูง

รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบแนวโน้มภาระกดสูงสุด

จากผลที่ได้จากการทดลองและผลจากการคำนวณทางทฤษฎีพบว่า ภาระกดสูงสุดเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณทางทฤษฎีมีค่าที่แตกต่างกันอย่างมากดังแสดงตามตารางที่ 6 โดยผลที่ได้จากการทดลองจะมีค่าที่น้อยกว่าผลจากการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกันจะได้ว่าผลจากการทดลองมีค่าเพียง 25.54, 29.58 และ 32.57 เปอร์เซ็นต์ของผลการคำนวณทางทฤษฎีสำหรับกระดาษชนิด 125, 185 และ 230 แกรมตามลำดับ ซึ่งความคลาดเคลื่อนระหว่างการทดลองกับการคำนวณอันเนื่องมาจากความไม่สมบูรณ์ของท่อผนังบาง (Imperfect Cylinder Shell) ซึ่งจะเกิดขึ้นกับท่อผนังบางโดยทั่วไป โดยภาระการกดสูงสุดจากการทดลองมีค่าเพียง 30 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ของการคำนวณทางทฤษฎี [5] ซึ่งขึ้นกับวัสดุในการทำท่อผนังบาง

ลิขสิทธิ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Faculty of Engineering Chiang Mai University All Rights Reserved

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบภาระสูงสุดเฉลี่ย

วิธีการ	ภาระกดสูงสุด (นิวตัน)		
	ชนิด 125 แกรม	ชนิด 185 แกรม	ชนิด 230 แกรม
การทดลอง	55.40	156.44	314.91
การคำนวณ	216.90	528.82	966.98

7. สรุปผล

จากการศึกษาความสามารถรับภาระสูงสุดของท่อกระดาษผนังบางภายใต้ภาระกดในแนวแกนสรุปได้ว่า ภาระกดสูงสุดนั้นไม่ขึ้นกับตัวแปรรัศมี ความสูง และทิศทางกดตามแนวขนานหรือขวางเครื่อง แต่จะขึ้นอยู่กับชนิดน้ำหนักของกระดาษที่ใช้ โดยจะมีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อชนิดน้ำหนักของกระดาษมีค่ามากขึ้น และผลที่ได้จากการทดลองนั้นมีค่าที่น้อยกว่าผลจากการคำนวณในทางทฤษฎีเป็นอย่างมาก ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการนำไปพัฒนาการออกแบบท่อกระดาษผนังบางเพื่อนำมาใช้งานจริงโดยที่โครงสร้างไม่เกิดความเสียหาย

เอกสารอ้างอิง

[1] Petri Mäkelä, Sören Östlund (2003). Orthotropic elastic–plastic material model for paper materials. *International Journal of Solids and Structures 40 (2003) 5599–5620*

[2] Maurizio Paschero, Michael W. Hyer (2009). Axial buckling of an orthotropic circular cylinder: Application to orthogrid concept. *International Journal of Solids and Structures 46 (2009) 2151–2171*

[3] ASTM Designation : D685-93 (Reapproved 2002). Standard Practice for Conditioning Paper and Paper Products for Testing.

[4] ASTM Designation : D828-97 (Reapproved 2002). Standard Test Method for Tensile Properties of Paper and Paperboard Using Constant-Rate-of-Elongation Apparatus.

[5] Alexander Chajes. *Principles of structural stability theory.* Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright©by
Faculty of Engineering
Chiang Mai University
All Rights Reserved